

# 一种无线传感器网络拥塞控制机制

孙国栋<sup>①</sup> 廖明宏<sup>①</sup> 邱 硕<sup>②</sup><sup>①</sup>(哈尔滨工业大学计算机学院 哈尔滨 150001)<sup>②</sup>(中国科学院计算技术研究所 北京 100081)

**摘 要:** 无线传感器网络的拥塞会增加网络延迟、降低网络吞吐量、尤其不利于传感器网络的节能。该文提出了一种能量有效的无线传感器网络拥塞控制机制, 主要包括逐跳拥塞反馈和速率调节两部分。节点周期性地计算其上游节点发送速率和本地缓冲队列可用空间, 并根据一定策略来推测在当前周期内发生拥塞的可能性; 拥塞节点的上游节点收到拥塞反馈后根据自身缓冲队列的使用情况来降低速率, 此拥塞节点同时向其下游节点申请提高发送速率; 基站根据应用要求以闭环方式调节源速率。仿真实验表明, 该文的拥塞控制机制不仅能有效地缓解网络拥塞, 还保持了网络吞吐量的稳定并具有良好的能源有效性。

**关键词:** 无线传感器网络; 拥塞控制; 速率调节

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)10-2494-05

## A Congestion Control Scheme in Wireless Sensor Networks

Sun Guo-dong<sup>①</sup> Liao Ming-hong<sup>①</sup> Qiu Shuo<sup>②</sup><sup>①</sup>(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)<sup>②</sup>(Institute of Computing, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Wireless sensor networks congestion often leads to increasing network latency, decreasing throughput and wasting the limited sensor node energy. In this paper, an energy-efficient congestion control scheme, which can alleviate congestion in wireless sensor networks, is proposed. The scheme includes hop-by-hop congestion message feedback and rate adjustment. Node periodically samples its queue occupancy and the packet rates of its upstream neighbors, and infers whether congestion will occur in the current time interval. Upon receiving the congestion feedback, these upstream nodes decrease their rate according to their local queue occupancies. Furthermore, sink adjusts the source rate related to some event which is beyond or below the application fidelity. The simulation results show that the proposed scheme is more effective and energy-efficient in congestion alleviation than CODA.

**Key words:** Wireless sensor networks; Congestion control; Data rate adjustment

### 1 引言

无线传感器网络(WSN)<sup>[1-3]</sup>是一种基于事件驱动模式的无线通信网络。由于无线信道特征随时间变化很快, 并且可能存在于邻近节点间的大量的、并发的数据发送操作会相互干扰, 以及传感器节点的计算能力和存储空间非常有限, 网络拥塞几乎一定会发生于 WSN 的通信过程中<sup>[4]</sup>。WSN 拥塞会导致节点缓冲区溢出, 进而引起丢包和大量的包重传操作, 这既不利于节约有限的网络带宽和有限的节点能源, 又不利于保持网络吞吐量的稳定。然而, 由于传感器节点的能源和计算能力都十分有限, 并且 WSN 与 Internet 网络和 Ad hoc 网络等传统网络应用背景和技术要求也不完全一致, 已有的传统网络的拥塞控制机制不适用于 WSN 应用环

境<sup>[5,6]</sup>, 所以设计能源有效的拥塞控制机制是 WSN 设计和应用面临的一个主要问题。

文献[7]提出了一个包含拥塞控制的可靠传输协议 ESRT, ESRT 关心的是所有源节点的速率而不是单个节点的速率, 它总是根据网络可靠性的要求使用统一的策略来强制调节所有源节点的发送速率。ESRT 不能很好地处理短暂的拥塞并且不适用于大规模网络或异构节点网络。CODA<sup>[8]</sup>是目前 WSN 拥塞控制机制中的一个典型的机制, 它包含 3 个基本策略: 基于接收端的拥塞检测、开环逐跳的反馈机制、闭环多源速率调节。CODA 节点周期性地对当前信道负载进行采样来检测是否发生了拥塞; 接收到拥塞反馈消息的上游节点根据本地策略降低其发送速率或者直接丢弃收到数据包; CODA 还通过闭环多源速率调节来保证基站单位时间吞吐量满足应用准确性(fidelity)的要求。CODA 这种从局部开始缓解网络拥塞的思想降低了网络丢包率, 但由于它的

2007-03-28 收到, 2007-10-08 改回

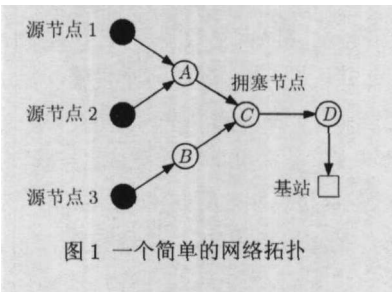
国家自然科学基金重点项目(60533110)资助课题

基于 AIMD 的速率调节策略导致了源速率震荡严重,不利于保持网络吞吐量的稳定性和公平性;另外,节点对信道的周期性监听也消耗了额外的能源。文献[9]提出的 Fusion 把逐跳的流控制、源节点速率限制机制、基于优先级的 MAC 算法三种策略结合在一起缓解网络拥塞,它主要考虑了网络传输的效率和公平性;和 CODA 一样 Fusion 对 MAC 层的实现细节依赖较多。文献[10]提出一种多对一的拥塞控制机制,它通过限制上游节点的发送速率以缓解拥塞并提高网络传输的公平性,对网络节能考虑较少。CRDD<sup>[11]</sup>对 CODA 的速率调节函数进行了改进并且使用独立的信道进行拥塞反馈消息的通信,保证了网络吞吐量的稳定性。因为节能依然是 WSN 应用的最重要挑战,本文针对已有 WSN 拥塞控制机制在能源有效性等方面的一些不足,提出了一个新的能量有效的 WSN 拥塞控制机制。仿真实验结果表明,与 CODA 相比,本文提出的拥塞控制机制在降低了网络丢包率节约了网络能耗的同时还保持了网络吞吐量的稳定性。

2 拥塞控制机制的设计

2.1 基本思想

本文的拥塞控制机制包含两个部分:(1)拥塞检测和逐跳的拥塞控制与反馈;(2)速率调节。基本过程如下(如图 1 所示):首先,节点 C 周期性地计算本地缓冲队列使用情况和上游节点发送速率来检测当前时间段内发生拥塞的可能性,如果检测到拥塞就向其上游节点集  $U(C)$  中的节点反馈拥塞消息,图 1 中  $U(C) = \{A, B\}$ ,节点 A 和 B 根据各自缓冲队列使用情况按一定策略降低发送速率;收到拥塞反馈的下游节点 D 根据本地策略来决定是否提高拥塞节点 C 的发送速率以尽快释放 C 的缓冲队列;另外,基站周期性地计算单位时间内已收到相关事件数据包个数  $N$ ,并根据  $N$  和应用准确性要求(fidelity)的比较结果确定源速率调节。



2.2 拥塞检测与反馈

有效的拥塞检测策略是网络拥塞控制机制的一个关键部分。对信道使用情况周期性的检测是 CODA 检测拥塞的主要手段,这类基于信道负载的拥塞检测方法增加了节点能耗,并可能导致对拥塞情况的不恰当估计,比如当节点缓冲队列内只有几个数据包等待发送时,而信道采样值却超过了规定的阈值,此时的拥塞可能是暂时的或者不会发生,但是拥塞反馈却要引发其上游节点进行一系列速率调节操作,而

且如果上游节点速率降低幅度过大还会引发 CODA 的多源速率调节操作,所以 CODA 的吞吐量震荡较明显。文献[9]的实验也表明当网络负载增加时,基于节点队列使用情况的拥塞检测要好于基于信道采样的拥塞检测。Fusion 规定节点缓冲队列的使用比例超过 25%为拥塞标志,这种方法虽然避免了节点检测信道的额外能耗,但是不利于区分不同节点之间拥塞程度的差异。

考虑到节点宝贵的能源和拥塞检测的有效性,本文拥塞检测的基本思想为:节点每隔  $\Delta t$  时间(一个检测周期)周期性地检测当前缓冲队列的可用空间,并把自身发送速率与其上游节点的发送速率结合起来推测到下一个检测周期开始前缓冲队列是否会溢出,进而检测拥塞的发生。式(1)描述了节点  $i$  在时刻  $t$  缓冲队列中可用空间  $Q_r(i, t)$  在检测周期内的变化情况。

$$Q_r(i, t + \Delta t) = Q_r(i, t) + N_{out}(i, \Delta t) - N_{in}(i, \Delta t) \tag{1}$$

其中  $N_{in}(i, \Delta t)$  表示  $\Delta t$  时间内节点  $i$  接收到数据包的个数,  $N_{out}(i, \Delta t)$  表示节点  $i$  发送到下一跳节点的数据包个数,当  $Q_r(i, t + \Delta t) \leq 0$  时,节点  $i$  在当前  $\Delta t$  内将发生拥塞。如果在路由拓扑中  $i$  的所有上游节点的集合表示为  $U(i)$ , 则  $N_{in}(i, \Delta t)$  和  $N_{out}(i, \Delta t)$  可表示为

$$N_{in}(i, \Delta t) = \sum_{j \in U(i)} r_j(t) \Delta t_j \tag{2}$$

$$N_{out}(i, \Delta t) = r_i(t) \Delta t_{out} \tag{3}$$

在式(2)和式(3)中,  $\Delta t_j$  表示上游节点  $j$  发送数据到  $i$  所用的时间(或时隙的个数),  $\Delta t_{out}$  表示  $i$  向下游节点发送数据所用的时间(或时隙的个数);  $r_j(t)$  和  $r_i(t)$  表示在当前周期内  $j$  和  $i$  的数据发送速率,显然有  $\Delta t_{out} + \sum_{j \in U(i)} \Delta t_j \leq \Delta t$ 。由于无线信道特征的动态变化,合理地估计当前检测周期内各节点的发送速率及其对信道的占用情况是拥塞检测要考虑的关键因素。如果节点  $i$  在前一个  $\Delta t$  内没有检测到拥塞,并且总的发送时间记为  $\Delta t_{out}$ 、用在接收每个上游节点数据的平均时间记为  $\bar{t}_{in}$ ,一般可以假设  $\Delta t_{out}$  和  $\bar{t}_{in}$  在当前的  $\Delta t$  内保持不变,而且  $i$  的发送速率与其上游节点的发送速率不变,那么可以根据上一个  $\Delta t$  内的信道使用情况和上游节点发送速率来估计当前缓冲区的变化范围,即在当前  $\Delta t$  内节点  $i$  收将收到的数据包个数  $N'_{in}(i, \Delta t) \approx \bar{t}_{in} \times \sum_{j \in U(i)} r_j(t)$  且  $i$  将

发送的数据包个数  $N'_{out} \approx N_{out}$ 。仿真实验也表明这种线性的预测方式能较有检测拥塞。

节点  $i$  每隔  $\Delta t$  时间周期性地计算  $Q_r(i)$ , 如果  $Q_r(i) \leq 0$  则设置当前缓冲队列内的数据包的拥塞标志位为 1。由于无线通信的广播特性,  $U(i)$  中的节点一般都能检测到该数据包的发送<sup>[9]</sup>并能解析到下游节点发生了拥塞。这种非显示地向上游节点捎带反馈拥塞消息的方法主要有两个优点:节约节点能源、节省有限带宽。值得注意的是,检测周期  $\Delta t$  的设置对拥塞检测的准确性和拥塞缓解的效率影响较大。如果

$\Delta t$  过小, 那么节点可能在  $Q_r(i)$  已经很小的时候才检测到拥塞, 这样, 节点不能较快地报告拥塞的发生、速率调节也不能及时启动, 进而不能快速缓解拥塞。如果  $\Delta t$  过大, 即使在还有较多可用缓冲空间的情况下, 节点也会频繁地反馈拥塞消息, 这使得网络节点的发送速率随时间震荡严重, 不利于维持网络吞吐量的稳定。在确定一个  $\Delta t$  优化值以满足一个特定目标之前, 要综合考虑节点缓冲区大小、网络规模、可用带宽等复杂因素, 本文只通过后面的仿真试验给出一个特定仿真环境下  $\Delta t$  的经验最优值。

### 2.3 速率调节

速率调节是拥塞控制中重要的一部分, 不仅能缓解拥塞, 还能通过调节原速率来满足应用数据准确性(fidelity)的要求。CODA 中拥塞节点  $i$  把自己的发送速率减半来降低下一跳节点  $d$  继续拥塞的可能性, 收到拥塞消息的上游节点  $u$  会降低发送速率或者直接抛弃接收到的数据包, 并决定是否向其上游节点继续发送拥塞通知; 如果  $u$  是源节点,  $u$  把发送速率减半。Fusion 要求检测到拥塞消息的上游节点  $u$  停止向拥塞节点  $i$  发送数据, 使  $i$  尽快清空缓冲队列; Fusion 容易导致  $u$  产生拥塞, 尤其是在源速率较高的情况下。本文的速率调节机制分为两部分: 局部的速率调节、基站到源节点的速率调节。前者主要指对拥塞节点本身及其上游节点发送速率的调节; 后者指当基站单位时间内收到的某个事件的数据包(event packet)的个数低于或高于应用要求时所进行的基站到源节点的速率调节。

**2.3.1 局部的速率调节** 当节点  $i$  的拥塞反馈被它的上游节点  $u$  收到时,  $u$  计算自身的发送速率  $r_u$  和缓冲队列可用空间  $Q_r(u)$ , 根据式(4)来把自己的发送速率降低到  $r'_u$ , 其中  $Q$  为网络节点初始化时缓冲区的尺寸,

$$r'_u = r_u \times \left(1 - \frac{Q_r(u)}{Q}\right) \quad (4)$$

式(4)表明  $Q_r(u)$  越大,  $u$  的速率下降幅度越大; 反之, 下降的幅度越小。这种方法考虑了上游节点缓冲能力的差别, 使缓冲能力弱的节点依然能保持较高发送速率来消耗缓冲的数据包以降低拥塞继续向上游扩散的可能。如果拥塞节点  $i$  的下游节点  $d$  已遇到拥塞则不响应  $i$  的拥塞事件。如果  $d$  没有遇到拥塞, 则根据  $Q_r(d)$  值和它的其他上游节点的拥塞状态来决定是否同意  $i$  提高发送速率到  $r'_i$ ; 节点  $d$  以捎带方式发送消息通知拥塞节点  $i$  按照式(5)来调整发送速率。节点  $i$  在下一个  $\Delta t$  开始时恢复发送速率到  $r_i$  以降低拥塞扩散到  $d$  的可能性。

$$r'_i = r_i \times (1 + \beta) \quad (5)$$

其中  $\beta = 1 - (|U_{\text{cong}}(d)| - 1) / |U(d)|$  且  $U_{\text{cong}}(d) = \{v \mid v \in U(d) \text{ 并且 } d \text{ 已确认 } v \text{ 的拥塞}\}$ 。限制拥塞节点速率提高的幅度小于等于 1 倍主要是为了降低拥塞向下一跳继续的可能性。

**2.3.2 基站到源节点的速率调节** 源节点  $s$  执行的速率调节分为两种情况: (1)响应下一跳拥塞节点而按式(4)降低发送

速率; (2)在基站收到的事件包(event packet)的个数低于或高于该事件准确性要求的情况下, 进行基站到源节点的闭环源速率调节。如果基站在单位时间内收到了  $n_e$  个关于事件  $e$  的数据包, 那么可以从这些数据包头中估计出产生  $e$  的每个源节点的速率  $r_j$ 。若网络应用规定事件  $e$  的数据准确性阈值为  $f_e$  (基站在单位时间内应至少收到的关于事件  $e$  的数据包的个数), 则可以根据  $n_e$  和  $f_e$  的比值来调节事件  $e$  的源节点速率。令  $\varepsilon = n_e / f_e$ , 如果  $\varepsilon > 1$ , 则与事件  $e$  相关的源节点  $j$  按照式(6)降低速率到  $r'_j$ ,

$$r'_j = r_j(1/\varepsilon) \quad (6)$$

那么  $n_e$  一般会在较短时间内收敛到  $f_e$  附近。如果  $\varepsilon < 1$  则源节点需要提高发送速率, 这种情况下, 由于网络应用对  $f_e$  的设定应该不会超过网络最大传输能力的限制, 所以可以认为按照式(6)提高源速率依然有效。这种针对不同事件对源速率进行调节的方式适合监测多类型事件的网络应用; 另外, 相关的源节点参考基站的计算结果能较准确地进行速率调节使其快速稳定在网络应用要求的水平, 这有利于保证网络吞吐量的稳定、降低网络丢包率和减少拥塞控制操作被引发的次数, 进而有利于节约网络能耗和网络带宽。基站的源速率调节信息需要逆向、逐跳地到达相关源节点; 具体的路由可以采用原有路由路径的逆向路径, 或者使用由冗余节点构造的中继网络。事实上, 对于中小规模的 WSN, 由基站直接广播源速率调节信息到相关源节点可以进一步降低网络能耗和提高源节点速率调节的准确性。

## 3 仿真实验

本文在 ns2<sup>[12]</sup>上进行了仿真实验考察和分析了本文机制和 CODA 在能量有效性、拥塞控制效率等方面的表现。在本文的实验中, 节点通信半径设置为 40m, 仿真区域为  $100 \times 100 \text{m}^2$  的正方形, 40 个节点随机均匀分布; 路由协议使用 DD<sup>[13]</sup>, 每个事件数据包尺寸为 128byte, interest 消息包尺寸为 36byte; MAC 协议使用 IEEE802.11DCF。拥塞检测周期  $\Delta t$  默认值为 100ms。每个实验包含 6 个源节点和一个基站, 基站位于正方形区域右边界中点上。实验开始时源节点速率为 120 数据包/s (ns2 中 802.11MAC 默认带宽为 1Mbps), 其他的仿真参数的设置与文献[8]一致。对每个实验都生成 5 个的随机拓扑, 取仿真结果的平均值作为该次实验的结果。

首先通过 20s 的仿真实验考察了两个机制下的丢包率和基站吞吐量等方面的性能。实验中随机选择 6 个节点作为源节点, 其它节点不产生数据包; 每隔 500ms 计算一次整个网络在该时间段内丢弃数据包的个数。可以从图 2 看出, 本文机制下的源节点发送速率在仿真开始不久便被控制在一个相对稳定的水平, 约 68 个数据包/s, 而 CODA 的源速率波动较大, 这是因为它的源速率的指数倍增加策略容易导致在拥塞缓解后再次出现新的拥塞, 而其源速率的指数倍降低

又容易导致基站吞吐量不能满足应用的要求，进而又引发源速率调节操作。如 2.3.2 小节所提，本文使用  $\epsilon$  来进行源速率调节，保证了单位时间内基站吞吐量的稳定，还降低了网络丢包率，进而节约了网络能耗。如图 3 所示，CODA 在仿真进行到第 8s 时开始缓解拥塞并将丢包率控制在约 220 数据包/s，本文机制在第 6s 时开始缓解拥塞并将丢包率控制在 152 数据包/s，导致两者差别的主要原因在于本文机制控制下的源速率比较稳定并且拥塞检测策略也更加有效。

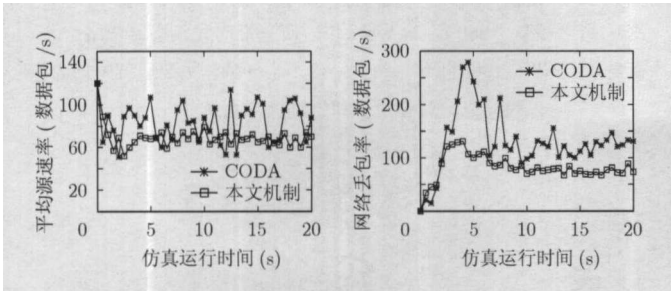


图 2 源节点平均速率比较

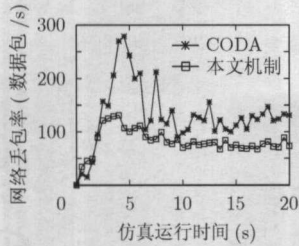


图 3 网络丢包率比较

图 4 的实验对数据包被丢弃之前已传输的跳数(生命周期)进行了统计，这个指标能有效地说明网拥塞控制机制的有效性和节能性。如图 4 所示，CODA 机制下被丢弃数据包生命周期的平均值为 1.8 跳，而本文机制有效地降低了拥塞继续向下一跳扩散的可能，所以该平均值仅为 1.2 跳。图 3 和图 4 的实验结果说明本文机制比 CODA 具有更好的能源有效性。在图 5 实验中考察了拥塞检测周期  $\Delta t$  对本文所提机制性能的影响，每个实验运行 100s，其他参数与图 4 中的实验参数设置相同。可以看到，随着  $\Delta t$  的提高，网络丢包率基本保持下降的趋势，而基站的单位时间吞吐量先升高并在  $\Delta t = 100\text{ ms}$  时达到最高点，然后开始下降。显然，大的  $\Delta t$  值导致一些网络节点频繁地推测拥塞的发生，这降低了网络丢包率的同时也限制了源节点的发送速率，所以  $\Delta t$  值的持续增加抑制了源节点的发送速率、降低了网络的吞吐量。

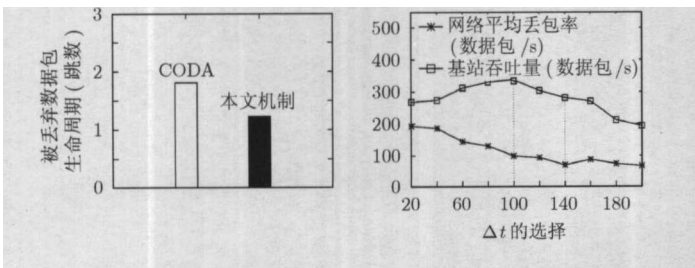


图 4 数据包被丢弃前已传输的跳数

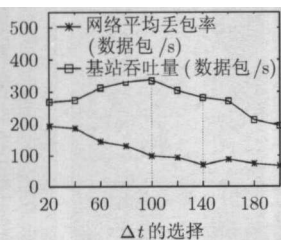


图 5 拥塞检测周期对网络性能的影响

4 结束语

本文提出了一种能源有效的无线传感器网络拥塞控制机制。首先，它通过同时考虑节点本身的缓冲能力与其上游

节点的发送速率来检测网络拥塞并逐跳地反馈拥塞信息；然后使用局部的速率调节和基站到源节点速率调节机制来缓解网络拥塞。本文拥塞控制机制的主要特点有：(1)把一个节点的上、下游节点发送速率和该节点的缓冲可用空间结合起来进行拥塞检测，这种方式不仅能较准确及时地检测到拥塞的发生，还能降低节点用于拥塞检测的能耗，同时尽量避免了拥塞向上游扩散的可能性，有效地维持了网络吞吐量的稳定；(2)源节点根据终端应用对相关事件包准确性的要求来进行基站到源节点的闭环速率调节，这种具有明确目的性的调节策略使网络吞吐量能快速地收敛到稳定状态，缓解了网络吞吐量的震荡也降低了网络丢包率，进而节省了网络能耗。仿真实验表明，与 CODA 相比，本文的拥塞控制机制能有效地降低网络丢包率并保持网络吞吐量的稳定，而且具有良好的能源有效性。对拥塞检测周期的量化研究以及如何降低拥塞控制操作导致的网络延迟将是本文下一步的工作。

参考文献

[1] Chong C, Kumar S, and Hamilton B. Sensor networks: Evolution, opportunities and challenges. *Proc. IEEE*, 2003, 9(18): 247-256.

[2] 任丰源, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.

Ren F Y, Huang H N, and Lin C. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003, 14(7): 1282-1291.

[3] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇等. 无线传感器网络研究进展. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.

Cui L, Ju H L, and Miao Y, et al. Overview of wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, 42(1): 163-174.

[4] Tilak S, Abu-Ghazaleh N, and Heinzelman W. Infrastructure tradeoffs for sensor networks. *Proceedings of first international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, Atlanta, USA, 2002: 49-59.

[5] Wang C, Sohraby K, and Li B, et al. A survey of transport protocols for wireless sensor networks. *IEEE Network*, 2006, 20(3): 34-40.

[6] 李凌, 周兴社, 李士宁等. 基于无线传感器网络的拥塞控制算法的研究与比较. 计算机应用研究, 2006, 3(11): 11-13.

Li L, Zhou X S, Li S N, and Li Z G, et al. Study and comparison of congestion control algorithms in wireless sensor networks. *Application Research of Computer*, 2006, 3(11): 11-13.

[7] Sankaasubramanianm Y, Akan O, and Akyildiz I. Event-to-Sink reliable transport in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2005, 13(5): 1003-1016.

[8] Wan C Y, Eisenman S, and Campbell A. CODA: Congestion detection and avoidance in sensor network. *Proceedings of*

- ACM first conference on Sensor System, Los Angeles, USA, 2003: 266-278.
- [9] Hull B, Jamieson K, and Balakrishnan H. Mitigating congestion in wireless sensor networks. Proceedings of ACM second conference on Sensor System, Baltimore, USA, 2004: 134-147.
- [10] Cheng Tien Ee and Ruzena Bajcsy. Congestion control and fairness for many-to-one routing in sensor networks. Proceedings of ACM second conference on Sensor System, Baltimore, USA, 2004: 148-161.
- [11] 柳立峰, 邹仕洪, 张雷等. 基于定向扩散协议的传感器网络拥塞与速率控制. 北京邮电大学学报, 2006, 29(2): 90-93.
- Liu L F, Zou S H, and Zhang L, *et al.* A congestion and rate control scheme based on directed diffusion in wireless sensor networks. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2006, 29(2): 90-93.
- [12] ns2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, 2005.
- [13] Intanagonwiwat C, Govindan R, and Estrin D, *et al.* Directed diffusion for wireless sensor networking. *ACM /IEEE Transactions on Networking*, 2002, 11(1): 2-16.
- 孙国栋: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为传感器网络.
- 廖明宏: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为嵌入式计算、对等计算和先进操作系统.